

# 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 시스템의 상 개방 고장 시 데드타임 보상에 따른 고조파 분석

김승현\*, 최영준\*  
 제주대학교 전기공학과\*

## Harmonic analysis based on dead time compensation in case of phase open faults in IPMSM drive systems

Seung-Hyun Kim\*, Yeong-Jun Choi\*  
 Jeju National University Electrical Engineering\*

### ABSTRACT

본 논문은 전기자동차에 적용되는 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 시스템을 PSIM을 활용하여 모델링 하고, 상 개방 고장 진단에 활용되는 고조파 분석 시 인버터 스위칭의 데드타임 보상에 따른 고조파 특성을 분석하여 상 개방 고장진단에 대한 신뢰성을 높이고자 한다.

### 1. 서 론

최근의 전동기는 출력의 증대, 효율 향상, 소형 및 경량화를 요구 받는다. 이러한 요구에 부합하는 대표적인 전동기는 영구자석 동기 전동기이다. PMSM(영구자석 동기 전동기)은 일반적으로 회전자에 자석이 설치되며, 양호한 효율, 운전영역, 출력밀도를 특징으로 한다.<sup>[1]</sup> 그 중 IPMSM(매입형 영구자석 동기 전동기)은 전기자동차 분야에 구동용 전동기로 대부분 적용되고 있다.

전동기는 다양한 스트레스에 노출되며, 결합에 따라 각종 고장이 발생할 수 있다. 권선 고장은 권선의 결열 파괴 및 단선 등의 고장을 유발하며, 기계적인 스트레스는 베어링 고장 및 편심과 같은 고장을 유발할 수 있다. 이러한 고장들은 기기 손상, 비정상적인 소음 및 진동 발생, 오작동, 출력 저하와 같은 문제를 일으킨다. 전동기의 고장 및 오작동은 사용자에게 심각한 피해를 초래할 수 있다. 이에 사용자 및 기기를 보호하기 위해 전동기의 신뢰성 확보가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 IPMSM 구동 시스템을 PSIM을 사용하여 모델링하고 전동기의 상 개방 고장에 따른 상전류 고조파 분석을 통한 고장 진단 시 데드타임 보상이 제대로 이루어지지 않을 시 미치는 영향을 분석하여 고장 진단에 대한 신뢰성을 높이고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 전동기 구동 시스템 시뮬레이션 모델

IPMSM 구동 시스템의 시뮬레이션을 위해 PSIM을 활용하여 그림 1과 같이 모델링 하였으며, 데드타임 적용을 위해 PWM 신호에 지연 모듈을 적용하였다.

스위칭 전환 시 단락 사고를 방지하기 위해 사용되는 데드타임은 스위칭 소자의 종류와 용량에 따라 요구되는 시간이 다르며, IGBT 스위칭 소자의 경우 통상 1~3 $\mu$ s 정도가 사용된다.<sup>[2]</sup>

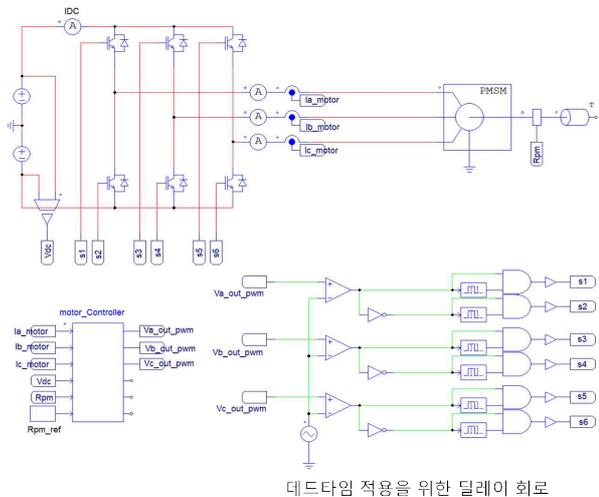


그림 1 IPMSM 구동 시스템 모델링  
 Fig. 1 Interior Permanent Magnet Synchronous Motor drive system modeling

시뮬레이션에 사용된 IPMSM의 파라미터는 표 1과 같고 고조파 분석을 위한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

표 1 IPMSM 파라미터  
 Table 1 Interior Permanent Magnet Synchronous Motor parameters

고정자 저항	0.2ohm	극수	6극
Ld	2.638mH	정격출력	5.5kW
Lq	15.331mH	정격전압	380Vrms
역기전력	150.2Vpeak/krpm	정격전류	8.9Arms
관성	0.0125kgm <sup>2</sup>	정격토크	17.5Nm

표 2 고조파 분석을 위한 시뮬레이션 조건  
 Table 2 Condition of simulation for harmonic analysis

PWM 기법	off-set PWM	데드타임	3 $\mu$ s
스위칭 주파수	10kHz	시스템 주파수	1MHz
전류 샘플링 주파수	20kHz	속도 샘플링 주파수	20kHz
토크제어	Maximum Torque Per Ampere		

본 논문에서는 그림 2와 같이 Semikron社의 SKHI 22B IGBT 게이트 드라이버에서 사용 가능한 4.3us의 데드타임 시간을 적용하여 고조파 분석을 진행하였다. 상 개방 고장 조건은 정격 속도에서 50%의 부하로 운전하고 있는 가운데 A상, B상, C상 중 한 상이 개방되었을 경우를 가정하였으며, 고조파 분석을 위한 주파수는 식 (1)과 같이 계산하였다.

P6 ; SELECT	P5 ; TDT1	P9 ; TDT2	interlock time t <sub>TD</sub> /μs
open / 5V	GND	GND	1,3
open / 5V	GND	open / 5V	2,3
open / 5V	open / 5V	GND	3,3
open / 5V	open / 5V	open / 5V	4,3
GND	X	X	no interlock

그림 2 SKHI 22B 게이트 드라이버 데드타임 설정  
Fig. 2 SKHI 22B IGBT gate driver interlock time setting

$$n = \frac{2}{P} \cdot f_s \cdot 60 = \frac{120 \cdot f_s}{P} [r/min] \quad (1)$$

## 2.2 데드타임에 따른 고조파 특성

그림 3은 3,000rpm 운전시 데드타임 적용 전후 고조파를 분석한 그래프이다. 그림에서 보이는 바와 같이 데드타임 적용되면 5차 및 7차 고조파의 비율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

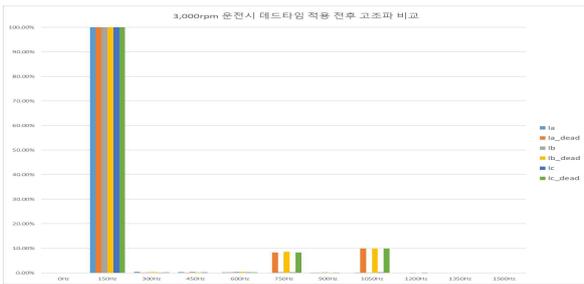


그림 3 데드타임 적용 전/후 고조파 분석  
Fig. 3 harmonic analysis before and after applying dead-time at 3,000rpm

그림 4에서 6은 상 개방 고장 시 데드타임 적용 전후 고조파를 분석한 그래프이다. 상 개방 고장 시 정상운전 상태에서 볼 수 없던 3차, 5차, 7차, 9차 성분의 고조파 비율이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 그 가운데 3차 고조파 비율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 데드타임 적용 전후를 비교했을 때 데드타임이 적용되었을 때의 고조파 비율이 데드타임이 적용되지 않았을 때보다 고조파 비율이 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

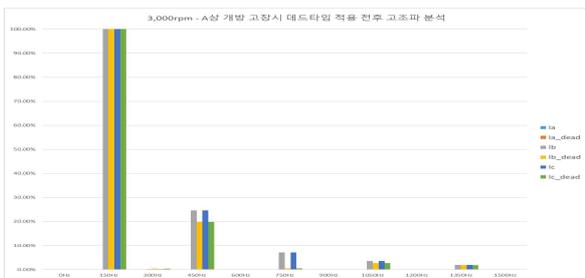


그림 4 A상 개방 시 데드타임 적용 전후 고조파 분석  
Fig. 4 harmonic analysis before and after applying dead-time on A phase open fault

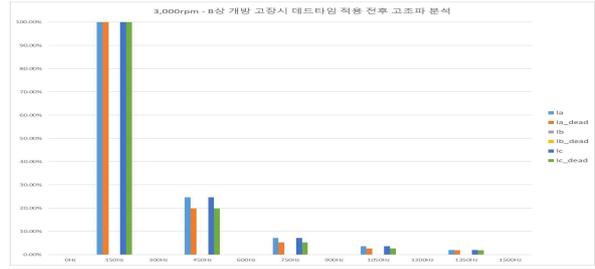


그림 5 B상 개방 시 데드타임 적용 전후 고조파 분석  
Fig. 5 harmonic analysis before and after applying dead-time on B phase open fault

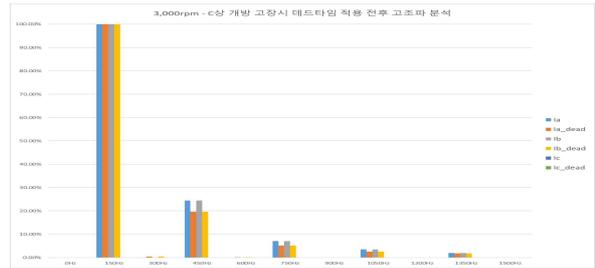


그림 6 C상 개방 시 데드타임 적용 전후 고조파 분석  
Fig. 6 harmonic analysis before and after applying dead-time on C phase open fault

## 3. 결론

본 논문에서는 IPMSM 구동 시스템에서의 상 개방 고장 시 데드타임 적용에 따른 고조파 분석을 진행하여 고조파를 통한 고장 진단 시의 신뢰성 향상에 대하여 연구하였다. 그 결과, 데드타임이 적용되었을 시 고장 시 나타나는 고조파의 비율이 데드타임이 적용되지 않았을 경우 보다 조금 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 이에 상 개방 고장 판단을 위한 고조파의 레벨 설정 시 데드타임을 고려하여 조금 낮은 레벨을 적용한다면 고장 진단에 대한 정확도가 높아질 것으로 사료된다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “전기차 통합유지보수 기반구축사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임(과제번호 : P0013681, 과제명 : 전기차 통합유지보수 플랫폼 기술개발)

## 참고 문헌

- [1] 임준혁, “연구자석 동기 전동기의 정적 편심 및 불가역 감자 고장 진단을 위한 평면형 자속 센서에 대한 연구”, 전력전자학회지 제28권 제3호 70-75페이지, 2023.
- [2] 김상훈, “모터제어 제 4판”, 북두출판사, 2022